第47卷　第3期
2024年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 3
Mar. 2024

近40 a来秦岭及周边地区极端降水变化特征

张宏芳[1]，　潘留杰[2]，　卢　珊[1]，　沈姣姣[1]

（1. 陕西省气象服务中心，陕西　西安　710014；2. 陕西省气象台，陕西　西安　710014）

摘　要：利用1980—2021年秦岭及周边地区337个气象监测站逐日降水资料，分析了极端降水的时空变化特征，并采用广义极值分布、气候统计等方法，对比了第一阶段（1980—2000年）和第二阶段（2001—2021年）极端降水年及春、夏、秋各季节的差异变化。结果表明：(1) 秦岭及周边地区极端降水主要集中在4—11月，其中7月极端降水日数最多，近40 a来极端降水整体呈增加趋势。日极端降水阈值、最大日降水量空间分布呈现东南高于西北，极端降水日数则呈现以秦岭为界，南部多、北部少。(2) 从全年角度看，2001—2021年较1980—2000年极端降水事件更多，极端性更强。日极端降水阈值、极端降水日数、最大日降水量的空间变化趋势总体也表现为增多趋势的站点数多于减少趋势的站点数。(3) 极端降水季节性差异明显，春季与夏季和秋季呈现出明显的不同。不管是极端降水概率还是极端降水次数，在春季总体表现为1980—2000年极端性更高，而夏季和秋季表现为2001—2021年更强。空间分布季节性差异也较明显，春季日极端降水阈值、极端降水日数总体表现为西部增加东部减小，从西向东表现为由正向负转变的分布，且负趋势站点多于正趋势站点。而夏季和秋季日极端降水阈值、极端降水日数呈增加趋势的站点超过呈减少趋势的站点，特别是秋季增加趋势的站点占比更多。

关 键 词：日极端降水阈值；最大日降水量；极端降水日数；时间变化

文章编号：1000－6060(2024)03－0380－11(0380～0390)

在气候变暖的背景下，全球大部分陆地的极端降水事件呈增加的变化趋势，这种现象在英国、美国、日本等区域降水的研究中均得到了证实[1-4]。根据世界气象组织及联合国环境规划署（IPCC）最新的第六次评估报告指出，随着气候变暖的加剧，极端降水事件发生的频率和强度将愈演愈烈[5]。

中国的极端降水变化特征与全球总体趋势基本一致，但区域性特征明显[6-7]，我国大部分地区都能观测到强降水和极端强降水事件频率增多、强度增强，并呈现出小雨减少暴雨增多的特征[8-10]。特别是在西北、长江中下游、东南沿海等地区，极端降水发生频率和降水强度增加趋势更加显著[11-13]。2012年7月21—22日，北京的特大暴雨过程，造成79人死亡，经济损失116.4×10^{8}元，并对超过190×10^{4}居民造成威胁[14-16]。2021年7月17—21日，河南省出现的罕见极端暴雨天气导致人员遇难和失踪，引发河道漫堤溃堤、城市严重内涝、农田被淹、交通停运，其造成的灾害极为严重[17]。这些极端降水天气是小概率高风险事件，因此深入研究全球增暖背景下极端降水异常特征对于科学理解洪旱灾害时空变化、减少灾害损失具有重要意义[18]。

秦岭是我国南方暖湿空气北上和北方干冷空气南下的自然屏障[19-20]。独特的地形地貌和气候特征使秦岭南北麓较易受极端降水的影响，且常常造成严重的洪涝灾害[21-22]。据国家自然灾害灾情管理系统数据显示，2021年因暴雨洪涝导致陕西直接经

收稿日期：2023-07-21；　**修订日期**：2023-10-06
基金项目：陕西省重点研发计划（2022SF-360）；中国气象局创新发展专项（CXFZ2022J023）；陕西省自然基金（S2023-JC-QN-2729）资助
作者简介：张宏芳（1981-），女，正高级工程师，主要从事应用气象与气象服务研究. E-mail: hongfanglj@sohu.com

济损失248.9×10^8元，为近年来最多。在气候变暖和全球极端降水增多的大背景下，秦岭南北近期降水量也整体呈增加趋势，降水日数下降，降水变化趋于极端化[20]。年极端降水量增加的区域位于关中中部大范围地区、东北部地区以及西南部地区，而东部的大部分区域和北部的关中地区西部年极端降水量却呈减少趋势[23]。同时，在陕西省与四川省、重庆市的交界处存在一个极端降水阈值中心[24]。尽管上述研究都揭示了秦岭及周边大部分地区极端降水呈增加趋势，但都是基于过去几十年作为一个整体来研究，近期极端降水是否较前期变化更加剧烈却很少有人研究，另外极端降水季节和空间的变化以及他们之间是怎么变化的也缺乏相应研究。基于以上问题，本文将1980—2021年分为1980—2000年和2001—2021年2个阶段，全面分析秦岭及周边地区极端降水阈值、极端降水日数、最大日降水量变化以及其空间和季节变化，这将为该地区极端降水事件的监测、评估、区划和防灾减灾气象服务等工作提供决策支持，同时也为提高该地区气候适应能力提供理论依据。

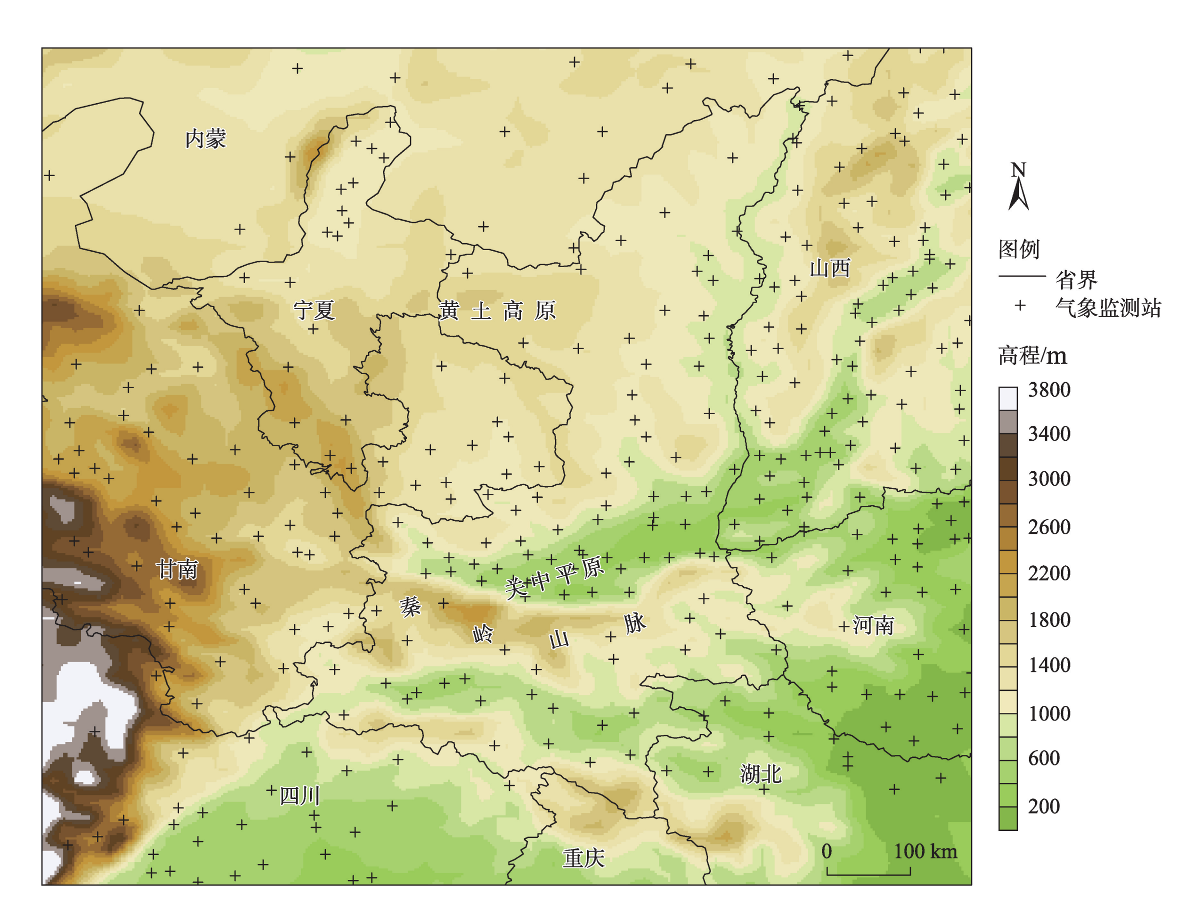
1　数据与方法

1.1　研究区概况

秦岭作为我国中部地区东西向山脉，东起河南伏牛山，西至甘肃迭山，东西长约800 km，南北跨越近200 km，南坡平缓，北坡陡峻，是我国南方暖湿空气北上和北方干冷空气南下的自然屏障。其中，秦岭以北属于暖温带半湿润气候，秦岭以南属于北亚热带湿润气候。本文研究区域（31°~40°N，103°~113°E）为秦岭及周边地区，包括陕西省、宁夏以及内蒙古、山西省、河南省、湖北省、四川省、甘肃省的部分地区（图1）。

1.2　数据来源

综合考虑了数据的长度、站点数量、缺失数据，逐日降水数据选自1980—2021年中国气象局337个气象监测站的气象资料。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS（2016）1606号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　研究区地形特征

Fig. 1　Topographical features of the study area

1.3 极端降水定义和统计

本文采用百分比阈值法来定义极端降水,超过阈值的降水事件被认定为极端降水事件[25]。具体方法为:先将某个站某年的所有有效日降水量(≥0.1 mm)进行从小到大排列,第99个百分位对应的日降水量定义为某站某年的日极端降水阈值。多年平均阈值为某站的日极端降水阈值。如果某站某日降水量大于等于该站的日极端降水阈值则认为发生了极端降水,记为一次极端降水[26]。另外,为了分析极端降水季节特征及其变化,使用气象上定义的季节,即春季为3—5月(MAM),夏季为6—8月(JJA),秋季为9—11月(SON)。

文中采用线性回归方法来分析极端降水的变化趋势,并采用Mann-Kendall非参数检验法进行显著性分析。极端降水概率分布采用广义极值分布,该方法是一种具有较强适用性的概率分布模型,在气象、水文等领域有广泛的应用。同时,由于广义极值分布能够较好地拟合降水的偏态分布,因而适用于强降水、干旱等极端天气气候事件的拟合[27-29]。根据位置参数不同,广义极值分布包括Weibull、Frechet、Gumbel 3种极值分布,分布函数如下:

$$F(x)=\begin{cases} e^{-\left[1+k\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}}}, & k\neq 0 \\ e^{-e^{-\frac{x-\beta}{\alpha}}}, & k=0 \end{cases} \tag{1}$$

式中:$F(x)$为分布函数;α、β、k分别为尺度、形状、位置参数。当$k>0$时为极值Ⅲ型(Weibull分布);当$k\rightarrow 0$时为极值Ⅰ型(Gumbel分布);当$k<0$时为极值Ⅱ型(Frechet分布)。

2 结果与分析

2.1 极端降水的气候特征

2.1.1 极端降水的空间分布 由1980—2021年秦岭及周边地区极端降水的空间分布特征(图2)可见,日极端降水阈值和最大日降水量总体表现为东南高于西北,极端降水日数则表现为南部多、北部少。甘肃省东部、宁夏、内蒙古的南部地区日极端降水阈值在20~40 mm之间,最小值出现在内蒙古吉兰泰站,仅有19.4 mm。陕西省、山西省西部、湖北省西北部日极端降水阈值在40~60 mm之间,四川盆地、河南省部分地区阈值大于80 mm,最大值出现在河南省南召站,为100.9 mm(图2a)。由研究区各站点多年极端降水日数的空间分布(图2b)可见,存在一条以秦岭为界南北走向的分界线,将南部的高值区和北部的低值区分隔开,极端降水日数>70 d的高值区主要集中在四川盆地、陕西省汉中市和安康市。在黄河沿线、山西省西部及河南省与山西省交接处日数较少,极端降水日数仅在30 d以下。极端降水日数与日极端降水阈值不同之处在于青藏高原东部的极端降水日数也较多,这一带降水量不大,但极端降水日数多。1980—2021年337个站点中最大日降水量最小值为41.6 mm,最大值为423.8 mm。最大日降水量≤50 mm的站点有5个,位于青藏高原东部的甘肃省、四川省及内蒙古。四川省都江堰站、北川站、绵竹站,河南省巩义站、偃师站、南召站,湖北省郧西站,陕西省宁陕站共计8个站点最大日降水量超过300 mm。

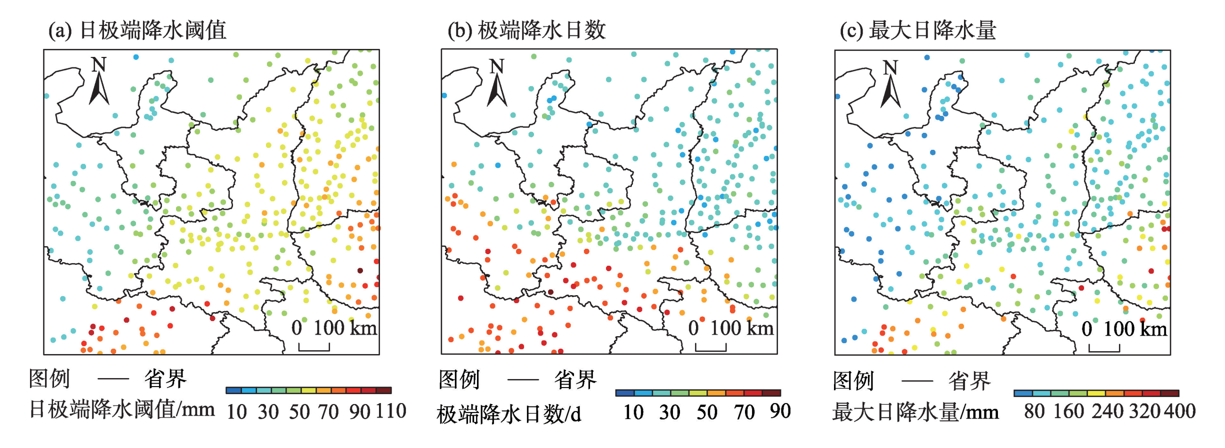


图2 1980—2021年研究区极端降水的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of extreme precipitation in the study area during 1980—2021

2.1.2 极端降水的变化趋势 1980—2021年研究区年极端降水阈值范围在40.2 mm（2015年）~65.0 mm（2013年）之间，81%的阈值集中在45~60 mm之间，年极端降水阈值≥50 mm有25 a，其中近20 a出现了15 a。通过5 a滑动平均的线性趋势来看，年极端降水阈值呈现上升趋势，增加的速度为1.5 mm·$(10a)^{-1}$（图3a）。研究区极端降水次数变化趋势与年极端降水阈值变化趋势类似，以每10 a平均增加2.1次的速度递增，2021年最多（565次），2015年最少（129次），有17 a极端降水>300次，其中近20 a出现了12 a。最大日降水量范围在133~423 mm之间，最大值出现在2013年，共有16 a最大日降水量≥250 mm，其中近20 a出现了10 a。从整体趋势分析，最大日降水量变化也呈波动的增加趋势，增加的速度为5 mm·$(10a)^{-1}$。总体来看，年极端降水阈值、极端降水次数和最大日降水量整体均呈增加趋势，且近20 a的高值出现次数较多。

2.2 1980—2000年和2001—2021年极端降水的对比分析

2.2.1 全年极端降水对比分析 考虑到我国天气预报业务中将单站24 h降水量≥50 mm的雨定义为暴雨，24 h降水量≥100 mm的雨定义为大暴雨，分别选择50 mm、100 mm、150 mm 3个阈值来进一步研究降水的极端变化。降水事件次数为研究区各站点日降水量达到或超过指定阈值的次数。相比1980—2000年，2001—2021年不同等级降水事件总体呈增加趋势（图4）。以日降水量≥50 mm为阈值，1980—2000年研究区年均降水事件为350次·a^{-1}，2001—2021年年均降水事件为392次·a^{-1}，年均降水事件增加42次·a^{-1}，增加率为12%（图4a）。以日降水量≥100 mm为阈值，研究区1980—2000年年均降水事件为39次·a^{-1}，2001—2021年为46次·a^{-1}，降水事件平均每年增加7次，增加率为18%（图4b）。以日降水量≥150 mm为阈值，1980—2000年年均降水

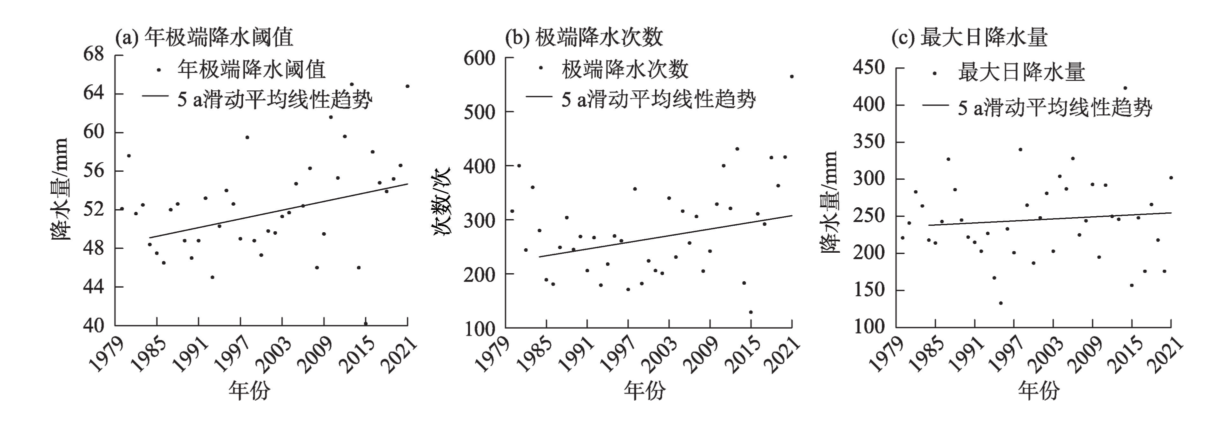


图3　1980—2021年研究区极端降水变化

Fig. 3　Changes of extreme precipitation in the study area during 1980—2021

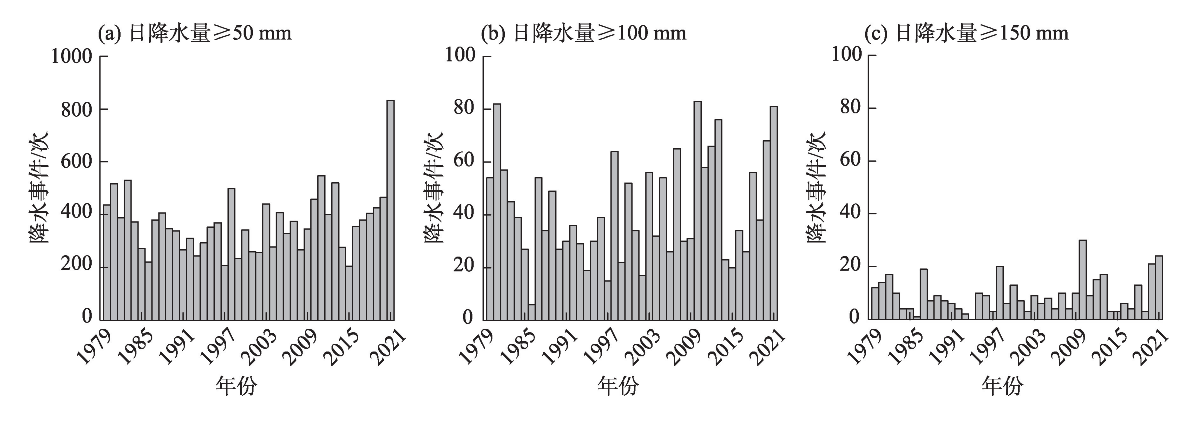


图4　不同等级降水事件的变化

Fig. 4　Changes in precipitation events at different levels

事件仅为8.1次·a⁻¹,2001—2021年为8.8次·a⁻¹,年均降水事件增加0.7次·a⁻¹,增加率为9%(图4c)。这种固定阈值下降水事件增加趋势与极端降水次数(图3b)变化趋势一致。

总体来看,研究区日降水量≥50 mm降水事件在1980—2000年共计7352次,2001—2021年共计8233次。1980—2000年日降水量≥100 mm的降水事件共出现了810次,2001—2021年增加到974次,特别是日降水量≥220 mm的降水事件由1980—2000年的25次增加到2001—2021年的40次,300 mm以上的降水事件也由1980—2000年的3次增加到2001—2021年的6次,这些都清楚地表明极端降水事件次数和幅度都在增加(图5)。

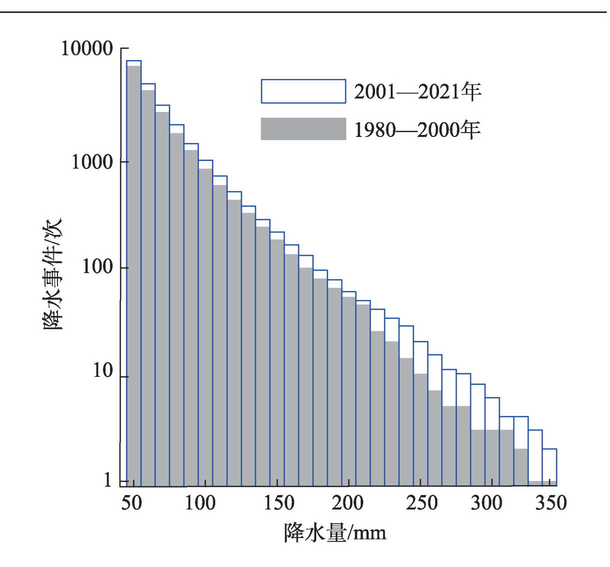


图5 日降水量≥50 mm降水事件的变化

Fig. 5 Changes in precipitation events with daily rainfall≥50 mm

统计1980—2021年区域内每个站点极端降水特征的趋势方向(正或负)来分析极端降水的空间变化特征(图6),研究区域337个站点中日极端降水阈值为增加趋势的站点占73%,明显增加的站点位于陕西省的关中西部和陕北、甘肃省平凉市和庆阳市、四川省巴中市和广元市、河南省洛阳市、山西省中西部的太原市、忻州市和吕梁市,这与杨涵洧等研究结论一致[24]。在这些增加趋势的站点中,通过了显著性检验的站点有21个。另外有26%的站点表现为减少趋势,这些站点位于山西省运城市和四川省绵阳市,他们均没通过0.05显著性水平检验。而极端降水日数增加趋势的站点仅占56%,其中达到0.05显著性水平的站点有30个,且主要位于陕西省的北部及商洛市、山西省西南部的太原市、吕梁市、晋中市及临汾市、甘肃省中部的景泰县和永靖县及四川省的广元市和绵阳市。12%的站点为减少趋势,位于陕南西南和湖北省襄阳市。32%站点无变化趋势。最大日降水量分布与日极端降水阈值分布类似,研究区域69%的站点都是增加趋势,其中有22个站点通过了显著性检验,29%的站点为减少趋势,2%的站点无变化趋势。

2.2.2 各季节极端降水对比分析 暖季是秦岭及周边地区降水量和降水频次主要集中的时段[30]。同样极端降水也存在明显的季节性。通过了解某个区域极端降水发生的时间范围可以为当地开展极端降水预报预警提供参考依据。为了确定极端降水主要出现的时段,下面就各站点大于等于区域平

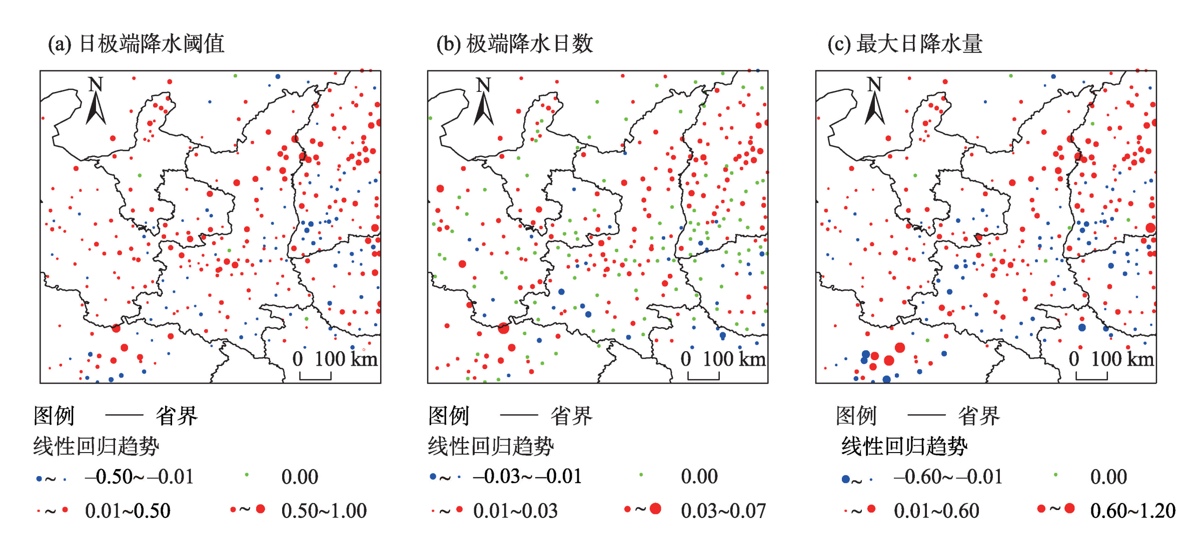


图6 1980—2021年各站点极端降水的变化趋势

Fig. 6 Change trends of extreme precipitation at each station during 1980—2021

均的日极端降水阈值(日降水量≥52.5 mm)降水事件进行统计。结果表明,从2月开始就有个别站点出现了极端降水,最早出现日期为2月4日,42 a中2月极端降水事件共出现了3次,均发生在2001—2021年之间;3月共出现了4次,这些站点主要位于陕西省和四川省的交界地区。4月极端降水开始逐渐增多,7月次数最多,最晚出现日期为11月19日。所以下文仅从春、夏、秋季考察极端降水的季节特征。

春季、夏季、秋季研究区平均日极端降水阈值分别为25.6 mm、55.3 mm、32.0 mm,基于以上阈值,图7分别给出了1980—2000年和2001—2021年春、夏、秋3季的降水概率密度分布。2个阶段的概率密度曲线与样本的直方图吻合较好,说明广义极值分布在2个阶段都有很高的拟合效果。在春季,随着降水量增加,相对1980—2000年,2001—2021年极端降水概率呈现先偏大后偏小的特征,1980—2000年日降水量≥51 mm的极端降水概率高于2001—2021年;在夏季,2个阶段极端降水概率分布交替出现且差异较小;在秋季,相比1980—2000年,2001—2021年的日降水量在32~52 mm之间的极端降水概率偏低,而当日降水量≥52 mm后,2001—2021年的概率偏高。总体来看,在秋季,2001—2021年极端强降水事件出现的概率高于1980—2000年,而这些小概率的大降水事件往往会对地质环境脆弱区造成山洪、泥石流等自然灾害。

直方图(图8)和概率分布(图7)相似,但是不同的是直方图分析原始数据,而不是概率推算。春季,2个阶段日降水量最大值都出现在5月,分别出现在1998年5月21日(175.7 mm)和2011年5月9日(173.3 mm)。日降水量≥50 mm降水事件:1980—2000年613次,2001—2021年443次。夏季,1980—2000年最大日降水量出现在1997年8月15日(340.9 mm);2001—2021年出现在2013年的7月9日(423.9 mm)。日降水量≥50 mm的降水事件由1980—2000年5685次增加到2001—2021年的5988次。秋季,2个阶段最大日降水量都出现在9月,1980—2000年出现在1981年9月2日(283.5 mm);2001—2021年出现在2001年的9月19日(281.2 mm)。日降水量≥50 mm降水事件由1980—2000年的1024次

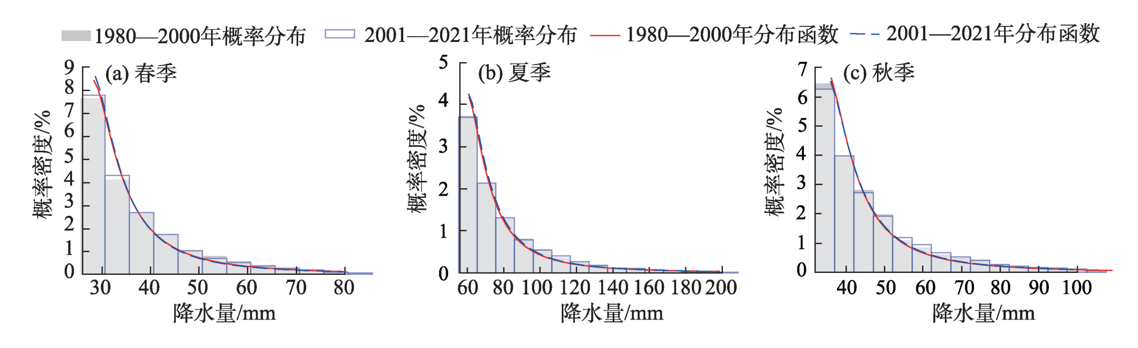


图7　各季节极端降水的概率密度函数

Fig. 7　Probability density functions of extreme precipitation for each season

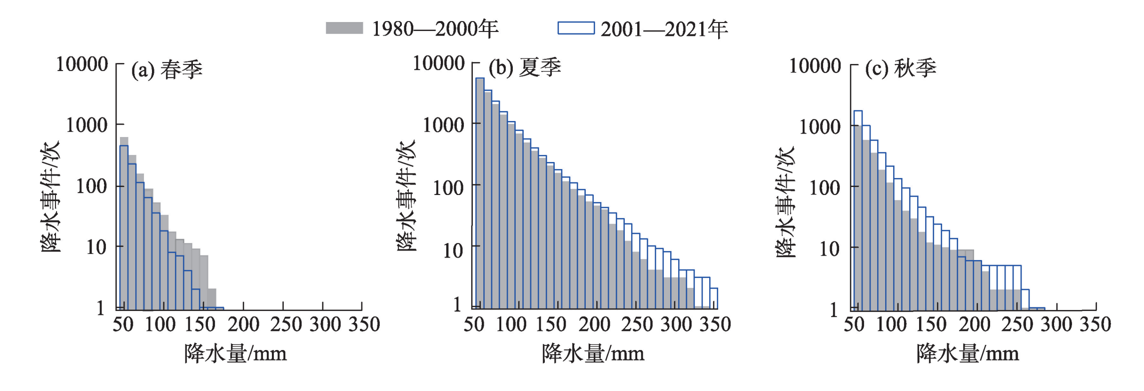


图8　各季节日降水量≥50 mm降水事件的变化

Fig. 8　Changes in precipitation events with daily rainfall ≥50 mm for each season

增加到2001—2021年的1792次，除日降水量为180~190 mm之间的降水事件1980—2000年偏高外，秋季其他量级的极端降水均为2001—2021年偏高。1980—2000年≥250 mm的极端事件共出现了10次(6月和7月各出现了3次，8月和9月各2次)。2001—2021年≥250 mm的极端事件共出现了13次，其中7月8次、8月2次、9月3次。相比1980—2000年，2001—2021年≥250 mm的极端事件主要在7月和9月增加。

总之，2001—2021年的极端降水强度和次数均较1980—2000年增加，主要贡献来源于夏季和秋季。

由于在各季节统计里，某站某年第99个百分位对应的日降水量绝大多数就是某年最大日降水量，所以此处不再分析最大日降水量变化。图9中各季日极端降水阈值、极端降水日数变化的空间分布差异明显，其中春季变化最小，夏季变化最大。春季有54%的站点日极端降水阈值呈现减少趋势，略多于增加的站点(41%)。前者主要分布在陕西省东南部、山西省西南部、湖北省西北部和四川省东北部，其中山西省河津站、沁县站、稷山站和四川省汶川站达到了0.05显著性水平。后者主要集中在陕西省西部、甘肃省东部、四川省西北部，其中甘肃的和政站、合水站、崆峒站及四川省九寨沟站4个站点达到了0.05显著性水平。春季极端降水日数变化的空间分布与日极端降水阈值基本一致，总体表现为西部增加东部减小，从西向东表现为由正向负转变的分布，且负趋势站点(57%)多于正趋势站点(12%)，不同在于337个站点中，有31%的站点都表现为无变化趋势。夏季日极端降水阈值呈增加趋势的站点占63%，通过了0.05显著性检验的站点有12个。这些站点主要位于甘肃省中部、山西省中部、四川省广元市和陕西省延安市。在陕西省宝鸡市、渭南市和安康市、山西省运城市、河南省洛阳市、四川省绵阳市及甘肃省庆阳市的日极端降水阈值变化呈现了负趋势，通过了0.05显著性检验的站点仅有四川省三台站和陕西省旬阳站(图9b)。夏季极端降水日数变化的空间分布与日极端降水阈值基本一致，增加趋势站点占46%，减少趋势站点

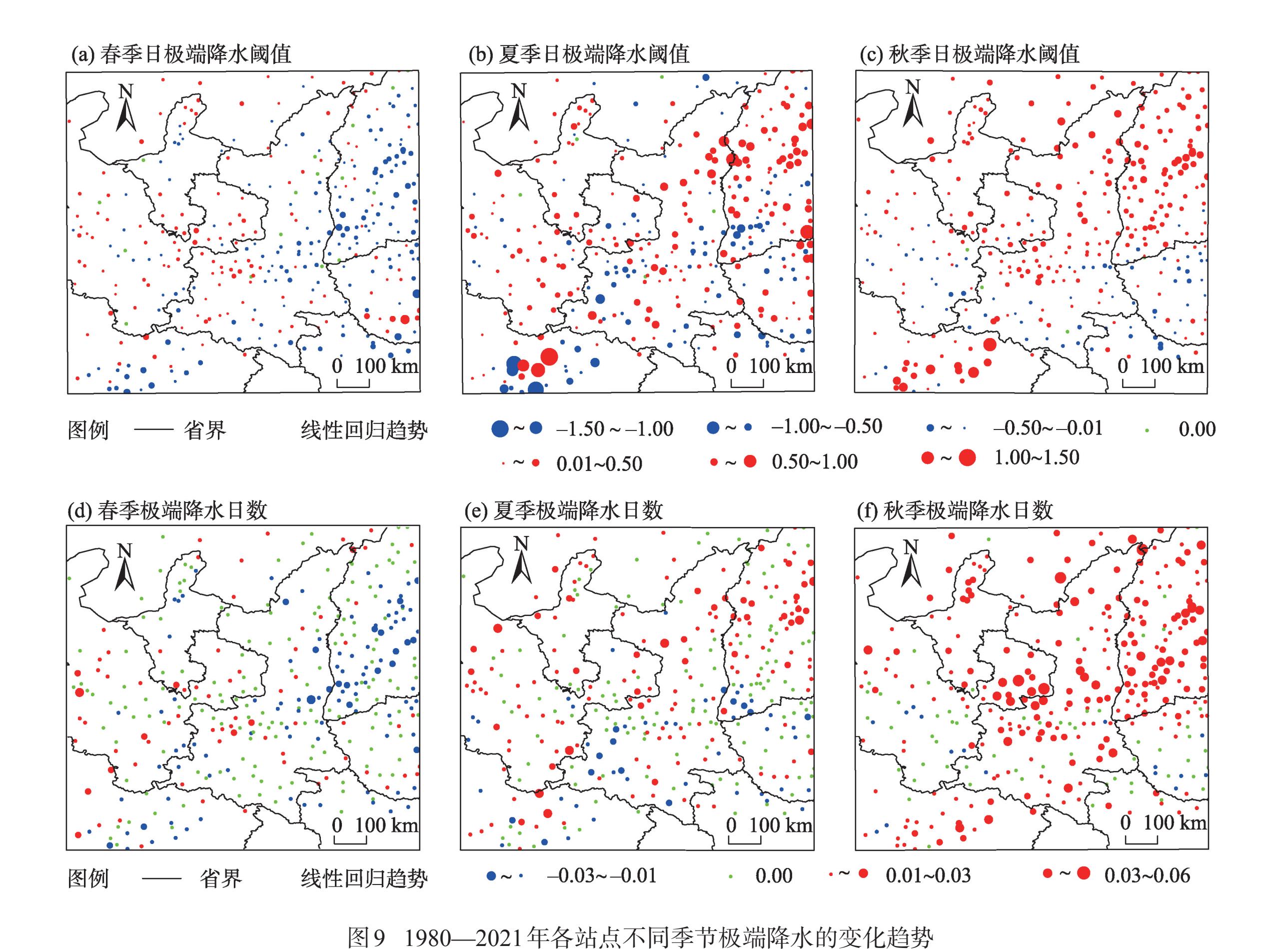


图9 1980—2021年各站点不同季节极端降水的变化趋势

Fig. 9 Change trends of extreme precipitation in different seasons at each station during 1980—2021

占15%，39%的站点无明显趋势。对于秋季的日极端降水阈值，增加趋势的站点占77%，其中有40个站点达到了0.05显著性水平，多于春季和夏季。趋势明显增加的站点主要集中在2个区域，一个在陕西省关中以北、甘肃省庆阳市、宁夏和山西省等地的黄土高原，另一个在四川盆地。负趋势的站点占21%，位于陕西省南部、甘肃省南部、河南省西部和湖北省西北部。秋季极端降水日数变化与日极端降水阈值分布基本一致，呈增加趋势的站点（77%）明显多于呈减少趋势的站点（4%），其中10%站点呈显著增加趋势。与其他季节一样，极端降水日数无明显趋势站点比例（19%）较日极端降水阈值偏多。

3 讨 论

极端降水事件频发给世界各地造成了严重的经济和人员损失，社会各界都对其有着广泛关注[31]。秦岭及周边地区气候变化复杂，降水分布不均且汛期容易发生暴雨洪涝灾害[32]，因此开展极端降水异常特征研究，对于科学理解洪旱灾害时空变化、减少灾害损失具有重要意义。

本文通过分析极端降水的时空变化特征，发现秦岭及周边地区极端降水总体呈现出增加的趋势，这与中国的极端降水事件变化较为吻合[8-10]。也与前期关于该地区的研究基本一致[20,23-24]。但前期研究主要集中在全年及暖季的极端降水变化特征上，很少有针对不同季节极端降水变化的研究。虽然极端降水主要发生在暖季，但其他季节的变化特征也非常关键。本文通过详细对比分析了春、夏、秋各季节极端降水的变化，发现秦岭及周边地区季节性特征明显，其中春季与夏季和秋季存在明显的差异，全年极端降水总体呈增加的趋势主要贡献来源于夏季和秋季，了解极端降水不同季节的变化特征可以为当地开展极端降水预报预警提供参考依据。

4 结 论

（1）空间上，日极端降水阈值、最大日降水量呈现出东南高、西北低的空间分布特征，极端降水日数则表现为以秦岭为界，南多北少。陕西省南部、四川盆地、湖北省西北部极端降水的阈值高、日数多，强度大；青藏高原东部阈值低、强度小，出现频次高，陕西省关中平原及北部地区、山西省中西部阈值较高，但强度低、出现频次低。时间上，研究区年极端降水阈值、极端降水次数、最大日降水量年际变化较大。近40 a极端降水整体呈现增加趋势，通过5 a滑动平均的线性趋势来看，年极端降水阈值、极端降水次数、最大日降水量分别以1.5 mm·$(10a)^{-1}$、2.1次·$(10a)^{-1}$、5 mm·$(10a)^{-1}$的速度增加。

（2）从全年角度看，对比日降水量≥50 mm降水事件可以清楚地发现2001—2021年较1980—2000年极端降水事件更多。相比1980—2000年，2001—2021年日降水量≥50 mm、≥100 mm、≥150 mm的年均降水事件分别增加12%、18%、9%。从空间变化来看，日极端降水阈值与最大日降水量变化的空间分布较为相似，均为增加趋势的站点数比例大，明显增加的站点位于陕西省关中西部和北部地区、甘肃省平凉市和庆阳市、四川省巴中市和广元市、河南省洛阳市、山西省中西部的太原市、忻州市和吕梁市。极端降水日数虽然也是增多趋势的站点数多于减少趋势的站点数，但无变化趋势的站点数比例偏大。

（3）从各季节极端降水变化来看，春季与夏季和秋季有较大差异。在春季，1980—2000年的日降水量≥50 mm降水事件和极端降水概率均较2001—2021年偏大。在夏季和秋季，2001—2021年日降水量≥50 mm降水事件整体高于1980—2000年，且2001—2021年秋季降水概率也偏高。空间分布差异也较明显，春季日极端降水阈值、极端降水日数总体表现为西部增加东部减小，从西向东表现为由正向负转变的分布，且负趋势站点多于正趋势站点。而夏季和秋季日极端降水阈值、极端降水日数呈增加趋势的站点超过呈减少趋势的站点，特别是秋季增多趋势的站点占比更多。

参考文献（References）

[1] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2006, 314(5804): 1442-1445.

[2] Osborn T J, Hulme M, Jones P D, et al. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(4): 347-364.

[3] Howarth M E, Thorncroft C D, Bosart L F. Changes in extreme precipitation in the northeast United States: 1979—2014[J]. Journal

of Hydrometeorology, 2019, 20(4): 673-689.
[4] Yamamoto R, Sakurai Y. Long-term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years[J]. World Resource Review, 1999, 11(2): 271-281.
[5] 樊星, 秦圆圆, 高翔. IPCC第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议[J]. 环境保护, 2021, 49(增刊2): 437-444. [Fan Xing, Qin Yuanyuan, Gao Xiang. Interpretation of the main conclusions and suggestions of IPCC AR6 Working Group I Report [J]. Environmental Conservation, 2021, 49(suppl. 2): 437-444.]
[6] Zhou X Y, Bai Z J, Yang Y H. Linking trends in urban extreme rainfall to urban flooding in China[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37(13): 4586-4593.
[7] 陈海山, 朱月佳, 刘蕾. 长江中下游地区冬季极端降水事件与天气尺度瞬变波活动的可能联系[J]. 大气科学, 2013, 37(4): 801-814. [Chen Haishan, Zhu Yuejia, Liu Lei. Relationship of synoptic-scale transient eddies and extreme winter precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(4): 801-814.]
[8] Li W, Chen Y. Detectability of the trend in precipitation characteristics over China from 1961 to 2017[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(suppl. 1): E1980-E1991.
[9] Ma S M, Zhou T J, Stone D A, et al. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over eastern China[J]. Journal of Climate, 2017, 30(4): 1381-1396.
[10] 贺冰蕊, 翟盘茂. 中国1961—2016年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 437-444. [He Bingrui, Zhai Panmao. Characteristics of the persistent and non-persistent extreme precipitation in China from 1961 to 2016 [J]. Climate Change Research, 2018, 14(5): 437-444.]
[11] Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005, 18(7): 1096-1108.
[12] 杨玮, 程智. 近53年江淮流域梅汛期极端降水变化特征[J]. 气象, 2015, 41(9): 1126-1133. [Yang Wei, Cheng Zhi. Variation characteristics of extreme precipitation during meiyu flood period over Yangtze-Huaihe Basin in recent 53 years[J]. Meteorogical Monthly, 2015, 41(9): 1126-1133.]
[13] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 923-935. [Chen Dongdong, Dai Yongjiu. Characteristics of northwest China rainfall intensity in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(5): 923-935.]
[14] 田付友, 杨舒楠, 郑永光, 等. 北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 27-36. [Tian Fuyou, Yang Shunan, Zheng Yongguang, et al. Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing area[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(1): 27-36.]
[15] Jiang X M, Yuan H L, Xue M, et al. Analysis of a heavy rainfall event over Beijing during 21-22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts[J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(2): 199-212.
[16] 甘璐, 郭文利, 邓长菊. 北京地区两次特大暴雨过程的对比分析[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 239-249. [Gan Lu, Guo Wenli, Deng Changju. Comparative analysis of two torrential rain processes in Beijing[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(2): 239-249.]
[17] 布和朝鲁, 诸葛安然, 谢作威, 等. 2021年"7.20"河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 725-744. [Bueh Cholaw, Zhuge Anran, Xie Zuowei, et al. Water vapor transportation features and key synoptic-scale systems of the "7.20" rainstorm in Henan Province in 2021[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(3): 725-744.]
[18] 郑祚芳, 王在文, 高华. 北京地区夏季极端降水变化特征及城市化的影响[J]. 气象, 2013, 39(12): 1635-1641. [Zhen Zuofang, Wang Zaiwen, Gao Hua. Characteristics of extreme precipitation events in summer and its effect on urbanization in Beijing area[J]. Meteorogical Monthly, 2013, 39(12): 1635-1641.]
[19] 王钊, 罗慧, 李亚丽, 等. 近50年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应[J]. 应用气象学报, 2016, 27(1): 85-94. [Wang Zhao, Luo Hui, Li Yali, et al. Effects of urbanization on temperatures over the Qinling Mountains in the past 50 years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, 27(1): 85-94.]
[20] 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 989-1007. [Li Shuangshuang, Wang Chengbo, Yan Junping, et al. Variability of the event-based extreme precipitation in the south and north Qinling Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 989-1007.]
[21] 毕旭, 王丽, 张雅斌, 等. 陕西秦岭北麓致灾短时暴雨特征及预警技术[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 122-127. [Bi Xu, Wang Li, Zhang Yabin, et al. Characteristics and early warning technology of short-time rainstorm along the northern side of Qinling Mountains in Shaanxi Province[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 122-127.]
[22] 王楠, 赵强, 井宇, 等. 秦岭北麓一次冷锋触发的短时强降水成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1277-1288. [Wang Nan, Zhao Qiang, Jing Yu, et al. Causation analysis of a short-time strong rainfall triggered by cold front at the northern piedmont of Qinling Mountains[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(5): 1277-1288.]
[23] 张明, 李国胜. 关中地区极端降水时空变化及概率特征研究[J]. 人民黄河, 2021, 343(11): 59-64. [Zhang Ming, Li Guosheng. Trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall in Guanzhong area[J]. Yellow River, 2021, 343(11): 59-64.]
[24] 杨涵洧, 龚志强, 王晓娟, 等. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析[J]. 大气科学, 2021, 45(3): 683-696. [Yang

Hanwei, Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, et al. Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme precipitation over eastern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(3): 683−696.]

[25] 李湘瑞, 范可, 徐志清. 2000年后中国北方东部地区夏季极端降水减少及水汽输送特征[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 1109−1124. [Li Xiangrui, Fan Ke, Xu Zhiqing. Decrease in extreme precipitation in summer over east northern China and the water-vapor transport characteristics after year 2000[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(5): 1109−1124.]

[26] 陈红专. 湖南极端降水的气候特征及天气系统分型研究[J]. 气象, 2021, 47(10): 1219−1232. [Chen Hongzhuan. Climatic characteristics and weather system classification of extreme precipitation in Hunan Province[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(10): 1219−1232.]

[27] 王颖, 刘晓冉, 程炳岩, 等. 广义极值分布在重庆短历时极值降水中的应用[J]. 气象, 2019, 45(6): 820−830. [Wang Ying, Liu Xiaoran, Cheng Bingyan, et al. Application of generalized extreme value distribution model to short-duration extreme precipitation in Chongqing[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(6): 820−830.]

[28] 李建, 宇如聪, 孙螆. 从小时尺度考察中国东部极端降水的持续性和季节特征[J]. 气象学报, 2013, 71(4): 652−659. [Li Jian, Yu Rucong, Sun Wei. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71(4): 652−659.]

[29] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲, 等. 基于极值理论的北京市极端降水概率分布研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(6): 639−650. [Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Kong Fanzhe, et al. Probability distribution of extreme precipitation in Beijing based on extreme value theory[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(6): 639−650.]

[30] 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 935−946. [Zhang Hongfang, Pan Liujie, Chen Haoming, et al. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 935−946.]

[31] 黄鑫, 焦黎, 马晓飞, 等. 基于RClimDex模型的近60 a中亚极端降水事件变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1039−1051. [Huang Xin, Jiao Li, Ma Xiaofei, et al. Change characteristics of extreme precipitation events in Central Asia in recent 60 years based on RClimDex model[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1039−1051.]

[32] 史维良, 车璐阳, 李涛. 陕西省汛期极端降水概率分布及综合危险性评估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1407−1417. [Shi Weiliang, Che Luyang, Li Tao. Probability distribution and comprehensive risk assessment of extreme precipitation in flood season in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1407−1417.]

Variation characteristics of extreme precipitation in Qinling and surrounding areas over the past 40 years

ZHANG Hongfang[1], PAN Liujie[2], LU Shan[1], SHEN Jiaojiao[1]
(1. Shaanxi Meteorological Service Centre, Xi'an 710014, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014, Shaanxi, China)

Abstract: Based on daily precipitation data from 337 meteorological monitoring stations in Qinling Mountains and surrounding areas during 1980—2021, the spatiotemporal characteristics of extreme precipitation were analyzed. The generalized extreme value distribution and climate statistics methods were used to compare the differences in extreme precipitation years and seasons (spring, summer, and autumn) between two phases: the first phase (1980—2000) and the second phase (2001—2021). The results are as follows: (1) Extreme precipitation in Qinling and surrounding areas mainly concentrated from April to November, with July registering the highest number of extreme precipitation days. Over the past 40 years, extreme precipitation has shown an overall increasing trend. Spatially, the southeast exhibits higher values for the extreme daily precipitation threshold and daily maximum precipitation than the northwest. Additionally, a clear boundary along the north-south direction, aligning with the Qinling, highlights more occurrences in the southern region than in the northern region. (2) On an annual scale, there is a discernible rise in both the number and intensity of extreme precipitation events during 2001—2021 compared with 1980—2000. The spatial changes in the extreme daily precipitation threshold, the number of extreme precipitation days, and daily maximum precipitation also show an overall increasing trend, with more meteorological stations exhibiting an increasing trend. (3) Considerable seasonal differences in extreme precipitation exist, particularly between spring and summer/autumn. The probability and frequency of extreme precipitation were generally higher in spring during 1980—2000, whereas in 2001—2021, extreme precipitation peaks in summer and autumn. Spatial distribution differences are also evident. In spring, the extreme daily precipitation threshold and the number of extreme precipitation days generally show an increasing trend in the western region, contrasting with a decreasing trend in the eastern region, transitioning from positive to negative values. A greater number of stations display a decreasing trend than an increasing trend. In contrast, in summer and autumn, the number of stations demonstrating an increase in the extreme daily precipitation threshold and the number of extreme precipitation days exceeds those witnessing decreasing trends, particularly in autumn, where the proportion of stations with increasing trends is higher.

Key words: extreme daily precipitation threshold; daily maximum precipitation; the number of extreme precipitation days; temporal change